



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Hybridi voimanlähteenä henkilöautoissa

Tommi Brusin

KONETEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

Maaliskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Hybridi voimanlähteenä henkilöautoissa

Tommi Brusin

Oulun yliopisto, Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2021, 40 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Lassi Keränen

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia henkilöautoissa käytettäviä hybridivoimanlähteitä. Työn tarkoituksena on avata lukijalle hybridautoihin liittyvää jaottelua ja termistöä. Työn myötä lukija osaa jakaa hybridivoimanlähteitä hybridiasteen ja hybridivoimansiirron osalta sekä tietää ominaispiirteitä eri hybridiasteille.

Hybridivoimanlähteitä tutkittiin kirjallisuuskatsauksella ja lähdemateriaalina käytettiin kirja-, lehti- ja verkkolähteitä. Kirjallisuuskatsauksen pohjalta hybridivoimanlähteisiin liittyvää termistöä ja jaottelutapoja koottiin yhteen. Tutkimuksesta voidaan todeta hybridautojen jaottelun olevan polttomoottoriautojen jaottelua monimutkaisempaa, sillä hybridivoimanlähde antaa laajat mahdollisuudet voimansiirron suunnittelulle. Hybridivoimanlähteitä vertailtiin myös keskenään ja polttomoottoriautojen kanssa muun muassa taloudellisuuden kannalta. Tämän pohjalta tuloksia voi hyödyntää muun muassa auton valinnassa ja kustannusten arvioinnissa.

Asiasanat: Hybridauto, hybridiaste ja voimansiirto

ABSTRACT

Hybrid power sources in cars

Tommi Brusin

University of Oulu, Degree Programme of Mechanical Engineering

Bachelor's thesis 2021, 40 pp.

Supervisor at the university: Lassi Keränen

The aim of this bachelor's thesis is research hybrid power sources in cars. This thesis helps the reader to understand classification and terminology about hybrid cars. After reading this thesis reader will know how to divide hybrid power sources with hybridization level or with powertrain. Reader will also know about the typical features of hybrid vehicles in different hybridization level.

The thesis about hybrid power sources in cars was performed as a literature review. Research gathers articles, magazines, books and online sources. The information of them is summarized to text and images. In this thesis, we can notice that the classification of hybrid cars is more complicate compared to the classification of internal combustion engine cars. We can also notice that hybrid power sources give many opportunities to place the components of powertrain. Hybrid cars are compared to each other and to internal combustion engine cars for economic aspect. These results can be applied to choosing new car or calculating the costs of car.

Keywords: Hybrid electric vehicle, degree of hybridization and powertrain

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

MERKINNÄT JA LYHENTEET

1 JOHDANTO	6
2 HYBRIDITEKNIikka	7
3 HYBRIDIASTEET	8
3.1 Mikrohybridi	8
3.2 Kevythybridi	9
3.3 Täyshybridi	11
3.4 Ladattava hybridi	12
3.5 Pidentetyn kantaman hybridi.....	13
3.6 Vähemmän käytetyt hybriditermit	14
4 HYBRIDIVOIMANSIIRTO.....	15
4.1 Polttomoottori ja sähkömoottori voimansiirrossa	15
4.2 Sarjahybridi	16
4.3 Rinnakkaishybridi	17
4.4 Yhdistelmähybridi.....	22
5 ENERGIAN VARASTOINTI AKULLE	25
5.1 Polttomoottorin hyödyntäminen sähköenergian tuottamisessa.....	25
5.2 Jarrutusenergian talteenotto	26
6 POHDINTA	28
6.1 Hybridiasteiden vertailu	28
6.2 Vertailua hybridi-, sähkö- ja polttomoottoriautojen välillä.....	30
6.3 Esimerkkilaskelmia hybridi- ja polttomoottoriautojen kuluista.....	32
6.3.1 Polttomoottori- ja täyshybridiauto kustannusvertailussa.....	33
6.3.2 Täyshybridi ja ladattava hybridi kustannusvertailussa	34
6.3.3 Ladattavien hybridien vertailu eri polttoaineilla.....	35
6.3.4 Tehokas hybridi- ja polttomoottoriauto kustannusvertailussa	36
7 YHTEENVETO	37
LÄHDELUETTELO	39

MERKINNÄT JA LYHENTEET

BSG	Lyhenne englannin kielestä Belt-alternator Starter Generator
EU	Lyhenne sanoista Euroopan Unioni
EREV	Lyhenne englannin kielestä Extended Range Electric Vehicle
FHEV	Lyhenne englannin kielestä Full Hybrid Electric Vehicle
HEV	Lyhenne englannin kielestä Hybrid Electric Vehicle
ISG	Lyhenne englannin kielestä Integrated Starter Generator
MHEV	Lyhenne englannin kielestä Mild Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Lyhenne englannin kielestä Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PSD	Lyhenne englannin kielestä Power Split Device
WLTP	Lyhenne englannin kielestä Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure

1 JOHDANTO

Voimanlähteenä henkilöautoissa hybridi on kasvattanut suosiotaan vuosi vuodelta ja markkinoilla on tarjolla yhä enemmän erityyppisiä hybridautoja. Hybridautoilu on tänä päivänä hyvin trendikästä ja niiden kehittämiseen panostetaan laajasti. Näiden asioiden takia halusinkin perehtyä enemmän erilaisiin hybridivoimanlähteisiin, sekä niiden ominaisuuksiin.

Työn tavoitteena on perehtyä henkilöautoissa käytettäviin hybridivoimanlähteisiin. Työssä tullaan jaottelemaan yleiset hybridivoimanlähteet hybridiasteen ja hybriditekniikan mukaan. Tavoitteena on myös vertailla eri hybriditekniikoiden ja hybridiasteiden hyötyjä ja haasteita.

Hybridiasteita on olemassa pidennetyn kantaman hybrideistä mikrohybrideihin. Näiden hybridivoimanlähteiden väliin mahtuu useita hybridiasteita, joita tullaan myös esittelemään. Käsiteltäviä hybriditekniikoita ovat bensiini- ja sähkömoottori yhdistelmät sekä diesel- ja sähkömoottori yhdistelmät kytkettynä sarjaan, rinnan tai yhdistelmänä.

Hybridijärjestelmiin liittyy olennaisesti energian varastointi akulle, joten siihen liittyvät yleisesti käytössä olevat ratkaisut myös esitellään. Työ sisältää vertailua sekä pohdintaa hybridi-, sähkö- ja polttomoottoriautojen välillä kuluttajan ja autovalmistajan näkökulmasta.

2 HYBRIDITEKNIikka

Hybridivoimanlähde tarkoittaa sitä, että autossa on enemmän kuin yksi voimanlähde. Yleensä voimanlähteinä toimivat polttomoottori ja sähkömoottori, mutta on olemassa myös sovellutuksia kaasuhybrideistä ja polttoainekennohybrideistä (Xue ym., 2020). Tässä työssä perehdytään kuitenkin vain bensiini- ja sähkömoottori hybrideihin ja diesel- ja sähkömoottori hybrideihin. Tämä johtuu siitä, että työssä käytettävät jaotellutavat toimivat lähinnä polttomoottorin ja sähkömoottorin yhdistelmille.

Hybridiautojen luokittelu on huomattavasti monimutkaisempaa verrattuna polttomoottori- ja sähköautoihin, sillä kahdesta voimanlähteestä voidaan tehdä lukemattomia määriä erilaisia kombinaatioita. Hybridivoimanlähteet voidaan jaotella energialähteiden lisäksi *voimansiirron, moottorien sijoittelun, latausmahdollisuuden ja hybridiasteen* perusteella. Hybridiautoista, joissa ei ole ulkoista latausmahdollisuutta käytetään lyhennettä **HEV** (Hybrid Electric Vehicles) ja ladattavista hybridiautoista lyhennettä **PHEV** (Plug-in Hybrid Electric Vehicles). (Wu ym., 2015)

Hybridiauton voimansiirto voidaan toteuttaa *rinnakkaishybridinä, sarjahybridinä* tai *yhdistelmähybridinä*. Lyhyesti sanottuna rinnakkaishybridi käyttää kahta voimanlähdettä yhdessä tuottamaan tehoa renkaille, sarjahybridissä vain toinen voimanlähde välittää tehoa renkaille ja yhdistelmähybridi vaihtelee tarpeen mukaan kahden edellisen välillä. Hybridiauton voimansiirtoon vaikuttaa myös moottorien sijoittelu, joka ohjaa erilaisiin ratkaisuihin. (Capata, 2018; Emadi ym., 2008)

3 HYBRIDIASTEET

Erilaisten hybridivoimansiirtoratkaisuiden lisäksi hybridivoimanlähteitä voidaan jaotella hybridiasteen mukaan. Hybridiaste kertoo, kuinka suuren osuuden sähköjärjestelmä tuottaa auton kokonaistehosta. Jaottelussa ei oteta kantaa, onko polttomoottorina dieselmoottori vai bensiinimoottori, koska sillä ei ole vaikutusta hybridijärjestelmän sijoitteluun tai toimintaan.

Hybridiasteen suurentuessa tyypillisesti käyttöjännite ja akun kapasiteetti kasvavat. Normaalissa polttomoottoriautossa akun jännite on 12 V, kun taas sähköautoissa akun jännite on yleisesti yli 300 V. Hybridiautoissa käytettävät akun jännitteet ovat hybridiasteen mukaan polttomoottoriauton ja sähköauton välillä. Hybridijärjestelmien akun kapasiteetti on noin 0,5–35 kilowattituntia riippuen hybridiasteesta ja automallista.

Hybridiasteen kasvaessa mukaan tulee myös sähköautojen kaltainen latausmahdollisuus. Latausmahdollisuus on mukana vain *ladattavissa hybrideissä* (PHEV) ja *pidennetyn kantaman hybrideissä* (EREV). Itselataavat hybridit (HEV) voidaan jakaa hybridiasteen mukaan *mikrohybrideihin* (Micro HEV), *kevythybrideihin* (Mild HEV) ja *täyshybrideihin* (Full HEV). (Pohjonen, 2018; Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

3.1 Mikrohybridi

Mikrohybridissä sähköjärjestelmän tuottama teho on alle 10 % laitteen kokonaistehosta (Xue ym., 2020). Mikrohybridissä vain polttomoottori liikuttaa autoa. Sähköjärjestelmä mahdollistaa moottorin sammuttamisen paikallaan oltaessa, esimerkiksi liikennevaloissa. Tätä järjestelmää kutsutaan yleisesti start-stop-järjestelmäksi. Start-stop-järjestelmän antama hyöty mikrohybridissä pienentää polttoaineen kulutusta noin 2–4 % (Wu ym., 2015).

Mikrohybridien start-stop-automaatiikka on toteutettu polttomoottoriautoa tehokkaammalla laturilla ja usein järjestelmälle on varattu myös oma akku. Start-stop-automaatiikkaa käytetään polttomoottorin tapaan 12 V käyttöjännitteellä. Tämän vuoksi ei ole pakollista suunnitella omaa sähköjärjestelmää, vaan voidaan halutessaan liittää mikrohybridin komponentit polttomoottoriauton omaan järjestelmään.

Mikrohybridissä akkuun varastoidaan energiaa polttomoottorin pyörittämällä laturilla ja akun varausta käytetään starttimoottorin pyörittämiseen. Toimintaperiaate vastaa siis hyvin pitkälti perinteistä polttomoottoriautoa ja ainoa sähköinen voimanlähde on starttimoottori, joka löytyy myös tavallisesta polttomoottoriautosta. Tästä syystä joissain yhteyksissä mikrohybridiä ei edes lasketa hybridiautoksi. (Posa, & Ahtiainen, 2020; Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

Mikrohybridin etuna on helppo liitettävyyys perinteiseen polttomoottoriautoon. Järjestelmä laskee polttoaineen kulutusta sammuttamalla polttomoottorin aina, kun polttomoottorin ei tarvitse olla käynnissä paikallaan oltaessa. Huonoksi puoleksi voidaan ajatella järjestelmän vaikutuksen vähäisyys.

3.2 Kevythybridi

Kevythybrideistä käytetään usein lyhennettä MHEV, joka tulee englannin kielen sanoista Mild Hybrid Electric Vehicle. Kevythybridissä sähköjärjestelmän tuottama teho on alle 20 % laitteen kokonaistehosta (Xue ym., 2020). Kevythybridiä liikuttaa pääosin mikrohybridin tavoin polttomoottori, mutta kevythybridissä on toinenkin voimanlähde, käynnistysmoottorigeneraattori. Käynnistysmoottorigeneraattori on käytännössä pieni sähkömoottori, joka on automalleista vaihdellen noin 2–10 kilowattia (Granström, 2019; Kia Motors Finland, 2020b; Munukka, 2019). Kevythybridissä käynnistysmoottorigeneraattori voidaan sijoittaa polttomoottoriautossa sijaitsevan laturin tilalle tai polttomoottorin ja vaihteiston välille (Emadi ym., 2008).

Suurin osa kevythybrideistä on toteutettu korvaamalla polttomoottoriautossa oleva laturi käynnistysmoottorigeneraattorilla (Xue ym., 2020). Käynnistysmoottorigeneraattori on kytketty hihnalla polttomoottorin kampiakselille. Sähkömoottori voi toimia generaattorina akulle tai avustaa moottoria.

Toinen käytetty vaihtoehto on sijoittaa käynnistysmoottorigeneraattori polttomoottorin ja vaihteiston välille. Mahdollisia ratkaisuja ovat sijoittaa sähkömoottori kampiakselille ennen vaihteistoa tai korvata polttomoottorin vauhtipyörä tai momentinmuunnin sähkömoottorilla. Näillä ratkaisuilla on korvattu kokonaan hihnavetoinen laturi moottorin etuosasta. Tämä on huomattavasti kalliimpi ja monimutkaisempi toteuttaa, jonka takia myös vähemmän käytetty ratkaisu kevythybrideissä. Sähkömoottorin sijoittaminen

moottorin ja vaihteiston väliin mahdollistaa paremman hyötysuhteen ja on kestävämpi ratkaisu. Tästä syystä ratkaisu sopiikin hyvin kevythybridiä korkeamman hybridiasteen ja tehokkaamman sähkömoottorin omaaville hybridautoille. (Emadi ym., 2008; Wu ym., 2015)

Kevythybrideissä käynnistysmoottorigeneraattorille on varattu oma akku ja sähköjärjestelmä. Akkukapasiteettia kevythybrideissä on noin 0,5–1 kilowattituntia (Granström, 2019; Kia Motors Finland, 2020; Munukka, 2019). Yleensä kevythybridijärjestelmällä on käytössä 48 V jännite, jolla saavutetaan 12 V järjestelmään verrattuna hieman enemmän tehokkuutta. Käytettäessä 48 V hybridijärjestelmää täytyy jännite muuntaa erillisellä muuntajalla muualla autossa käytettävään 12 V järjestelmään. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020).

Polttomoottorin koko ja haluttu avustuksen määrä kuitenkin vaikuttavat käyttöjännitteen valintaan. Esimerkkinä Audilla A4 mallin 4-sylinteriset bensiinimoottoriautot varustetaan 12 V kevythybridijärjestelmällä lukuun ottamatta tehoversiota S4 mallia, jossa käytetään 48 V kevythybridijärjestelmää tuomaan lisätehoa 6-sylinteriselle dieselmoottorille. (Granström, 2019)

Kevythybridissä sähkömoottorilla voidaan pyörittää polttomoottoria, joka mahdollistaa polttomoottorin käynnistämisen ilman starttimoottoria. Sähkömoottorilla voidaan antaa myös hiukan lisätehoa polttomoottorin ollessa päällä, esimerkiksi kiihdytyksissä. Kevythybrideissä on kuitenkin usein myös starttimoottori, jota käytetään muun muassa kylmäkäynnistyksissä käynnistysmoottorigeneraattorin sijasta. Sähkömoottorin toimiessa generaattorina voidaan polttomoottorin pyörimisenergiaa varastoida akulle. Jarruttaessa tai rullattaessa moottori sammutettuna voidaan jarrutusenergiaa varastoida akulle. (Emadi ym., 2008; Wu ym., 2015)

Sähkömoottorin käynnistäessä polttomoottori pyörittämällä ja avustamalla sitä, saadaan start-stop-järjestelmästä sulavampi ja nopeampi verrattuna mikrohybridiin (Emadi ym., 2008). Mikrohybrideissä start-stop-järjestelmä sammuttaa polttomoottorin vain pysähtyessä, kun taas kevythybridi voi sammuttaa polttomoottorin jo esimerkiksi risteykseen hiljentaessa. Lisäämällä kevythybridijärjestelmä tavalliseen polttomoottorilla toimivaan autoon, saadaan noin 8–11 % taloudellinen hyöty (Wu ym., 2015).

3.3 Täyshybridi

Täyshybrideistä käytetään lyhennettä FHEV, joka tulee englannin kielen sanoista Full Hybrid Electric Vehicle. Täyshybridissä sähköjärjestelmän tuottama teho on yleensä noin 30–50 % koko laitteen tehosta (Xue ym., 2020). Suurin käytännön ero täyshybridin ja kevythybridin välillä on täyshybridissä mahdollisuus liikkua pelkällä sähkömoottorilla (Wu ym., 2015).

Täyshybridissä sähköistä energiaa voidaan kerätä akkuun käyttämällä sähkömoottoria generaattorina muun muassa polttomoottorin ollessa päällä ja jarruttaessa, kuten kevythybridissäkin. Täyshybridissä on kevythybridiä tehokkaampi sähkömoottori, sähköiselle voimalinjalle oma korkeajännitesähköjärjestelmä ja akku. Korkeajännitejärjestelmä on kytketty muualla autossa käytettävään 12 V järjestelmään muuntajan avulla.

Sähkömoottorin sijoittelun mukaan täyshybridi voi tukea polttomoottoria tai toimia omana voimanlähteenä. Yleisiä sijoittelutapoja ovat sijoittaa sähkömoottori polttomoottorin ja kytkimen jälkeen, ennen vaihteistoa, vaihteistoon tai vaihteiston jälkeen. Erona kevythybrideihin, täyshybrideissä kytkin on polttomoottorin ja sähkömoottorin välissä, joka mahdollistaa polttomoottorin kytkemisen pois voimalinjalta sähköisen ajamisen aikana. Sähkömoottorin ollessa tehokas voidaan se sijoittaa jopa eri akselille polttomoottorin kanssa suoraan tai oman vaihteiston välityksellä. (Xue ym., 2020)

Täyshybridissä akun kapasiteetti on hieman kevythybridiä suurempi noin 1,5–2 kilowattituntia ja käyttöjännite on täyssähköauton luokkaa noin 300 V (Hyundai Motor Finland, 2021; Kia Motors Finland Oy, 2020; Lexus Europe, 2021; Toyota Auto Finland Oy, 2021; Wu ym., 2015). Sähköjärjestelmän jännitteen ollessa suurempi kuin kevythybridissä, saadaan sähkömoottorista enemmän tehoa ulos ja vastaavasti tehokkaammin energiaa talteen jarrutuksissa. Täyshybrideissä sähkömoottorin tuottama teho vaihtelee laajasti käyttökohteen mukaan ja on noin 30–105 kilowattia (Hyundai Motor Finland, 2021; Kia Motors Finland Oy, 2020; Lexus Europe, 2021; Toyota Auto Finland Oy, 2021). Sähköjärjestelmä on mikrohybridiä ja kevythybridiä huomattavasti suurempi ja monimutkaisempi, joiden takia myös kalliimpi ratkaisu toteuttaa.

Täyshybridin sähköistä liikkumista rajoittaa eniten ulkoisen latausmahdollisuuden puuttuminen. Tästä syystä polttomoottori onkin täyshybridissä pääenergialähde. Sähköjärjestelmä tukee polttomoottoria pienentäen polttoaineen kulutusta ja mahdollistaa polttomoottorin pitämisen sammutettuna esimerkiksi hitaasti ja tasaisesti ajettaessa. Näin ollen täyshybridijärjestelmä lisää taloudellisuutta 20–35 %. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

3.4 Ladattava hybridi

Ladattavista hybrideistä käytetään lyhennettä PHEV, joka tulee englannin kielen sanoista Plug-in Hybrid Electric Vehicle. Ladattavat hybridit eroavat täyshybrideistä selkeimmin ulkoisella latausmahdollisuudella ja sen mahdollistamalla suuremmalla akkukapasiteetilla. Täyshybriditä huomattavasti suuremman akkukapasiteetin turvin ladattavilla hybrideillä voidaan ajaa lyhyet matkat jopa täysin sähköllä. Ladattavien hybridien kantama pelkällä sähköllä ajassa on tänä päivänä jopa 40–70 kilometriä (Koistinen, 2020). Riippuen lataushybridin ohjausstrategiasta, voi sähkömoottori toimia avustavana voimanlähteenä pitkäkestoisesti, hetkellisenä tehonlääjänä tarpeen vaatiessa tai pääasiallisena voimanlähteenä niin kauan kuin akussa riittää virtaa. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

Ladattavien hybridien voimalinja voidaan toteuttaa usealla eri tavalla. Sähkömoottorin ollessa tehokas, voidaan se sijoittaa myös eri akselille polttomoottorista irtolaisena. Usein sähkömoottori on kuitenkin sijoitettu täyshybridin tapaan polttomoottorin ja kytkimen jälkeen ennen vaihteistoa, vaihteistoon tai vaihteiston jälkeen. Ladattavissa hybrideissä käytettävät sähkömoottorit ovat noin 45–135 kilowatin tehoisia (Kia Motors Finland, 2020a; Koistinen, 2020; Toyota Motors Finland Oy, 2021). Sähkömoottorin lisäksi lataushybridiin kuuluu korkeajännitesähköjärjestelmä noin 300 V jännitteellä ja ulkoisella latausmahdollisuudella. Akkukapasiteettia lataushybridissä on täyshybriditä enemmän, mutta täyssähköautoa vähemmän yleensä noin 8–20 kilowattituntia (Kia Motors Finland, 2020; Koistinen, 2020; Toyota Motors Finland Oy, 2021). Ulkoisen latausmahdollisuuden lisäksi lataushybridit hyödyntävät muun muassa jarrutusenergian talteenottoa ja on mahdollista käyttää myös polttomoottoria generaattorina. (Koistinen, 2020; Wu ym., 2015)

Ladattavien hybridien suurin etu alempiin hybridasteisiin on huomattavasti pidempi sähköinen kantama. Lyhyttä matkaa päivittäin ajavat voivat nauttia jopa täysin sähköisestä liikkumisesta, mutta sähköautoihin verrattuna polttomoottori takaa matkan jatkumisen akun tyhjentyessä. Alempiin hybridiluokkiin verrattuna ladattavan hybridin komponentit ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia, minkä vuoksi auton hinta nousee korkeammaksi. Suomessa lataushybridien markkinoita vauhdittaa polttomoottoriautoon verrattuna mitätön autovero ja käyttövoimavero, johtuen pienestä WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure) päästöluokituksesta. Alhainen autovero Suomessa tasoittaa lataushybridien ja polttomoottoriautojen hinnat suunnilleen samalle tasolle, joka ohjaa hybridiauton valintaan. (Koistinen, 2020)

3.5 Pidennetyn kantaman hybridi

Pidennetyn kantaman hybridistä käytetään lyhennettä EREV, joka tulee englannin kielen sanoista Extended Range Electric Vehicle. Pidennetyn kantaman hybridiä liikuttaa pääosin sähkömoottori. Pidennetyn kantaman hybridin peruseräite vastaa hyvin pitkälti ladattavaa hybridiä, mutta sähköistä voimalinjaa korostetaan enemmän. Pidennetyn kantaman hybrideissä käytetään noin 110–125 kilowatin sähkömoottoreita ja akkukapasiteettia on hieman ladattavaa hybridiä enemmän yleensä 15–35 kilowattituntia (Granström, 2018; Posa Henri, 2020). Käytännössä tarkoituksena on ajaa pelkällä sähköllä, mutta polttomoottori toimii matkan pidentäjänä akun tyhjentyessä nimensä mukaisesti. Pidennetyn kantaman hybridi vastaa ajaessa hyvin pitkälti täyssähköautoa, johtuen pääosin sähköisestä voimalinjasta.

Pidennetyn kantaman hybridi voidaan toteuttaa niin, että ainoastaan sähkömoottori liikuttaa autoa, jolloin polttomoottori toimii ainoastaan generaattorina. Tämä ratkaisu antaa laajat mahdollisuudet polttomoottorin sijoittelulle, sillä sen ei tarvitse olla kytkettynä voimansiirtoon. Polttomoottorin toimiessa ainoastaan generaattorina akuille, voidaan polttomoottori optimoida vain tietylle pyörimisnopeudelle (Bridges, 2015).

On myös mahdollista tehdä polttomoottorille oma voimalinja, jolloin polttomoottori pystyy avustamaan myös liikkumisessa. Tällöin voidaan käyttää polttomoottoria generaattorina ja voimanlähteenä esimerkiksi suurissa nopeuksissa. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

Pidennetyn kantaman hybridin etu verrattuna muihin hybridiasteisiin on korkean hybridiasteen mahdollistama sähköinen liikkuminen. Liikkuminen tapahtuu pääosin täyssähköauton tapaan, mutta matka ei katkea akun varauksen loppumiseen täyssähköauton tapaan.

3.6 Vähemmän käytetyt hybriditermit

Muita vähemmän käytettyjä hybridiasteeseen viittaavia käsitteitä ovat keskivahva hybridi (Medium HEV) ja vahva hybridi (Strong HEV). Vahvalla hybridillä viitataan tehokkaaseen sähköiseen voimalinjaan ja se voidaan luokitella täyshybridiksi hybridiasteen perusteella. Vahva hybridi on voimalinjaltaan täyshybridin kaltainen, joten on useita tapoja sijoitella sähkömoottori. Vahva hybridi pystyy liikkumaan myös hetkittäin pelkällä sähkömoottorilla.

Keskivahva hybridi voidaan luokitella kevythybridin ja vahvan-/täyshybridin välille hybridiasteen perusteella. Keskivahvassa hybridissä sähkömoottoreiden antama teho on noin 20–30 % kokonaistehosta. Keskivahvoissa hybrideissä sähkömoottori on yleensä sijoitettu polttomoottorin ja vaihteiston välille ennen kytkintä, kuten joissain kevythybrideissäkin. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

Lisäksi vanhemmissa lähteissä voidaan puhua voima hybrideistä (Power HEV's) ja energiahybrideistä (Energy HEV's). Voimahybridi vastaa hybridiasteeltaan täyshybridia, ja siinä on kevythybridia tehokkaampi sähkömoottori avustamassa polttomoottoria. Energiahybridi vastaa ladattavaa hybridiä hybridiasteeltaan. Energiahybridissä on yhtä tehokas tai tehokkaampi sähkömoottori kuin voimahybridissä. Ulkoisen latausmahdollisuuden ansiosta energiahybridiin on voitu mitoittaa huomattavasti voimahybridia suurempi akusto. (Emadi ym., 2008; Husain, 2011)

4 HYBRIDIVOIMANSIIRTO

Hybridiautojen voimansiirron pääkomponentit ovat *polttomoottori*, *sähkömoottori*, *kytkin*, *vaihteisto*, *tasauspyörästö* ja *vetoakseli*. Voimansiirtoratkaisuun vaikuttaa voimansiirtoon renkaille käytettävä tai käytettävät voimanlähteet, voimanlähteiden yhteistoiminta, voimanlähteiden sijoittelu sekä hybridiaste. Hybridivoimansiirto jaotellaan yleisimmin voimantuottotavan perusteella *sarjahybridiin*, *rinnakkaishybridiin* ja *yhdistelmähybridiin*.

Voimanlähteet voidaan kytkeä samalle akselille tai omille akseleille. Voimanlähteet voidaan kytkeä tuottamaan tehoa samalle akselille muun muassa sijoittamalla sähkömoottori tuottamaan tehoa polttomoottorin kampiakselille, käyttämällä kahden sisääntulon vaihteistoa tai sijoittamalla sähkömoottori polttomoottorin käytössä olevan vaihteiston jälkeen vetoakselille. Voimanlähteiden toimiminen omilla akseleilla toteutetaan yleensä omilla toisistaan irtonaisilla voimalinjoilla. Tällöin molemmilla voimanlähteillä voi olla oma kytkin, vaihteisto, vetoakseli ja tasauspyörästö. (Husain, 2011; Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

4.1 Polttomoottori ja sähkömoottori voimansiirrossa

Käytettäessä polttomoottoria voimantuottoon renkaille, on käytettävä vaihteistoa ja kytkintä voimalinjassa. Tämä johtuu siitä, että polttomoottorin käyttöalue alkaa vasta tyhjäkäyntikierröksiltä (noin 800 RPM) ja polttomoottorin kierrosalue ei yksistään riitä tarvittavalle renkaiden pyörimisnopeusalueelle. Käytettäessä sähkömoottoria voimantuottoon renkaille voidaan valita, kytketäänkö sähkömoottori suoraan vetoakseliin vai laitetaanko väliin vaihteisto ja kytkin. Sähkömoottorin käyttöalue alkaa kierrosnopeuden ollessa vielä lähes nolla. Sähkömoottorin kierrosalue on laaja verrattuna polttomoottorin kierrosalueeseen ja se mahdollistaa sähkömoottorin kytkemisen voimalinjaan myös ilman vaihteistoa.

Sähkömoottorin maksimivääntö sijoittuu heti käyttöalueen alkuun, kun taas polttomoottorissa suurin vääntömomentti saavutetaan vasta reilusti yli tyhjäkäyntikierrosten. Sähkömoottorin hyötysuhde voikin olla yli 85 % parempi liikkeellelähdoissä verrattuna polttomoottoriin. Tästä syystä käytetään sähkömoottoria usein avustavana voimanlähteenä liikkeellelähdoissä HEV-hybrideissä ja pääsääntöisenä

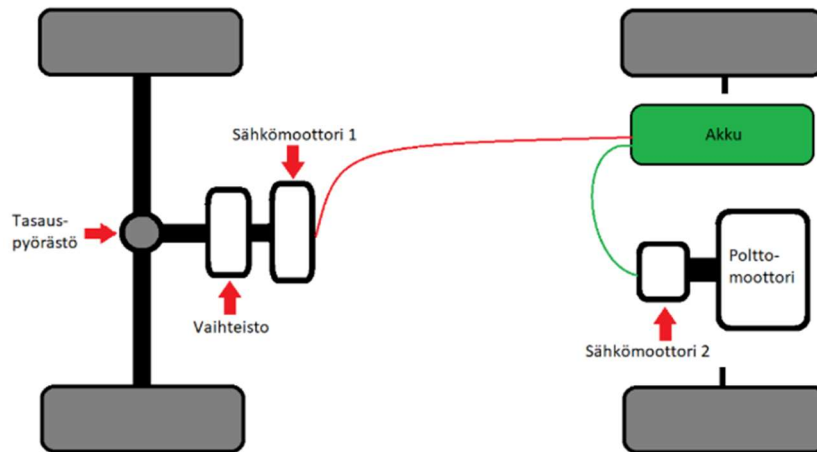
voimantuottaja alhaisissa ajonopeuksissa PHEV-hybrideissä. (Husain, 2011; Wu ym., 2015)

4.2 Sarjahybridi

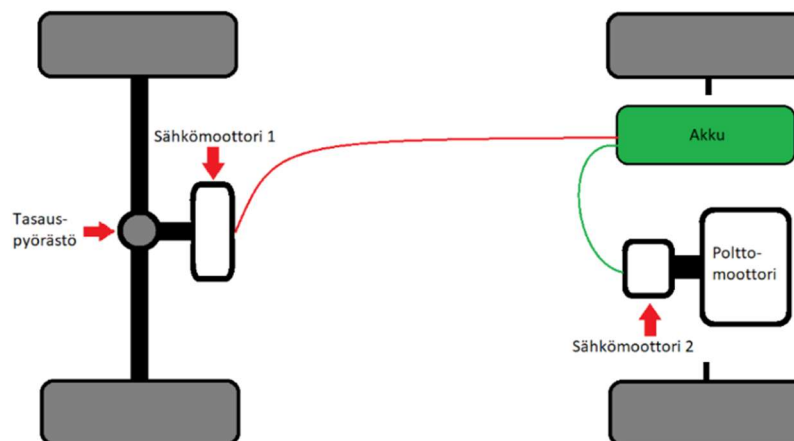
Sarjahybridissä ainoastaan toinen voimanlähteistä välittää tehoa renkaille. Tämä toteutustapa on selvästi rinnakkais- ja yhdistelmähybridiä rajoittuneempi ja siten myös vähemmän käytetty. Sarjahybridi voimalinjaa käytetään ainoastaan EREV-hybrideille ja siten, että sähkömoottori toimii ainoana tehonlähteenä renkaille. Tällaisissa ratkaisuissa polttomoottori toimii ainoastaan generaattorina ja näin muuttaa polttoainetta sähköenergiaksi sähkömoottorin akustolle.

Erilaiset sarjahybridiratkaisut koostuvat suurimmaksi osaksi samoista pääkomponenteista ja samanlaisesta voimalinjasta. Ainoa muuttuva komponentti voi olla sähkömoottoria käytettäessä valinnainen vaihteisto. Kuvassa 1 esitellään sarjahybridin voimansiirtorakenne, jossa sähkömoottorin ja renkaiden välillä on vaihteisto. Kuvassa 2 esitellään sarjahybridin voimansiirtorakenne, jossa sähkömoottori on kytkettynä voimansiirtoon ilman vaihteistoa. Kuvat 1 ja 2 ovat ainoastaan esimerkkikuvia mahdollisista voimalinjan sijoitteluista. Käytännössä polttomoottorin ja sähkömoottori 2:n muodostama generaattori ja akusto voidaan sijoitella hyvin vapaasti niille sopivaan tilaan. (Wu ym., 2015; Zhang ym., 2014)

Kuvassa 1 ja 2 paksu musta viiva kuvaa mekaanista yhteyttä komponenttien välillä ja vihreä ja punainen ohut viiva sähköistä yhteyttä. Tarkemmin vihreä viiva kuvastaa sähkövirran suunnan akkuun päin ja punainen viiva sähkövirran suunnan akulta poispäin. Kuvissa 1 ja 2 esiteltävät rakenteet vastaavat toimintaperiaatteeltaan toisiaan, vaikkakin toisessa voimansiirtoon sisältyy vaihteisto. Polttomoottori pyörittää sähkömoottoria 1, josta energia varastoidaan akustoon. Autoa liikuttaa sähkömoottori 2, joka on kytketty vetoakselille tasauspyörästön ja kuvassa 1 lisäksi vaihteiston välityksellä.



Kuva 1. Sarjahybridivoimansiirto vaihteistolla (mukaillen Wu ym., 2015).



Kuva 2. Sarjahybridivoimansiirto ilman vaihteistoa (mukaillen Wu ym., 2015).

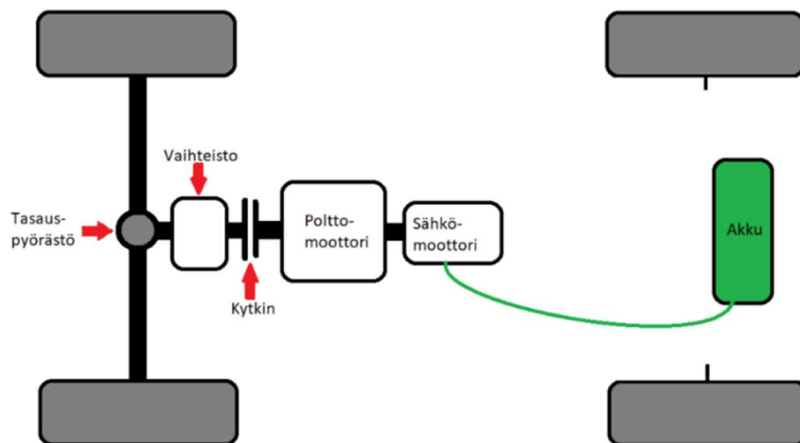
4.3 Rinnakkaishybridi

Rinnakkaishybridissä molemmat voimanlähteet ovat kytkettynä voimansiirtoon renkaille. Rinnakkaishybridin voimalinjalle on useita vaihtoehtoisia toteutustapoja, jotka voidaan jakaa muun muassa moottoreiden sijoittelulla samalle tai eri akselille. Ratkaisuja voidaan myös jaotella sen mukaan, onko käytössä yksi vaihteisto vai kaksi vaihteistoa tai kahden voimasisääntulon vaihteisto. Rinnakkaishybridin pääkomponentit voimalinjassa ovat voimansiirtoakselien ja tasauspyörästön lisäksi kytkin, vaihteisto, polttomoottori ja

sähkömoottori. Kuvissa 3–7 esitellään esimerkkitaupauksia rinnakkaishybridin voimalinjan asettelusta. Asetelmissa musta paksu viiva kuvaa mekaanista yhteyttä ja vihreä ohut viiva sähköistä yhteyttä. Kuvissa 3–7 hybridivoimansiirrot sisältävät polttomoottorin lisäksi yhden sähkömoottorin, jolloin sähkömoottori toimii voimantuottoon renkailla ja generaattorina akulle tarpeen mukaan.

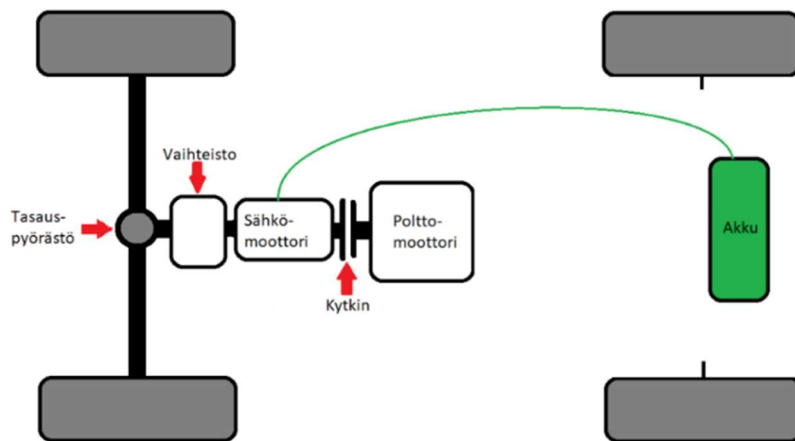
Polttomoottorin ja sähkömoottorin sijoittaminen samalle akselille voidaan jaotella vaihteiston, kytkimen ja polttomoottorin järjestyksellä. Samalla akselilla toimivat moottorit ovat mekaanisessa yhteydessä toisiinsa. Näin ollen moottorit voivat tukea toisiaan. Kytkimen sijoittelulla voidaan vaikuttaa siihen, mitkä komponentit voidaan kytkeä irti voimalinjasta hetkittäin. Kytkin täytyy kuitenkin sijoittaa aina polttomoottorin ja renkaiden välille, jotta polttomoottori voi käydä tyhjäkäyntiä auton ollessa paikallaan. Kuvissa 3–5 esitellään mahdollisia ratkaisuita polttomoottorin ja sähkömoottorin kytkemiselle samalle akselille. (Husain, 2011; Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

Kuvassa 3 esitellään ratkaisu, jossa sähkömoottori on sijoitettu polttomoottorin jatkeeksi samalle puolelle kytkintä ja vaihteistoa. Asettelu vastaa hyvin pitkälti tavallista polttomoottoriautoa, mutta sähkömoottori on tukemassa polttomoottorin tuottamaa pyörimisliikettä. Sähkömoottori voi olla kytkettynä polttomoottorin kampiakselille hihnalla tai kiinteästi polttomoottorin ja kytkimen väliin. Sähkömoottorin sijoittelun takia sähkömoottori ja polttomoottori ovat kiinteästi toisissaan kiinni ja kytkin on moottoreiden ja vaihteiston välillä. Tämä ratkaisu soveltuu erityisesti kevythybrideille. Voidaan myös mainita, että mikrohybridi on toteutettu tällaisella asettelulla, jossa hihnavetoisen sähkömoottorin tilalla on hihnavetoinen laturi. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)



Kuva 3. Rinnakkaishybridivoimansiirto yhdellä akselilla (mukaillen Wu ym., 2015).

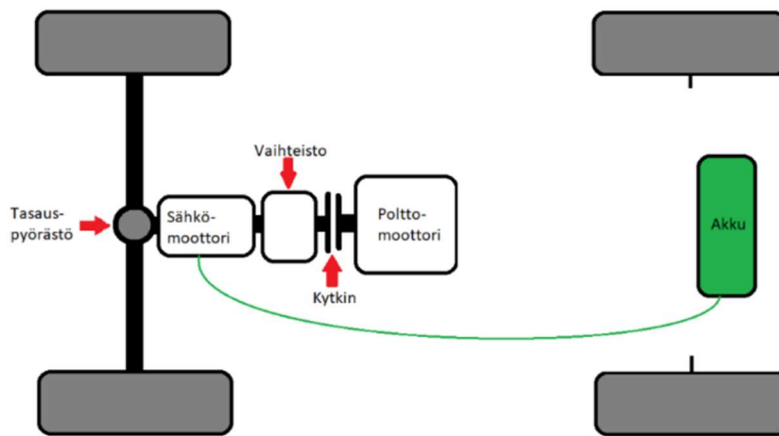
Kuvasta 3 poiketen kuvassa 4 esitellään voimalinja, jossa kytkin sijaitsee polttomoottorin ja sähkömoottorin välissä. Sähkömoottori on sijoitettu kytkimen ja vaihteiston välille, jolloin molempien voimanlähteiden tuottama pyörimisliike menee vaihteiston läpi renkaille. Ratkaisu mahdollistaa pelkän polttomoottorin kytkemisen kytkimen avulla pois voimalinjalta, jolloin ainoastaan sähkömoottori on yhteyksissä renkaisiin. Kuvan 4 voimalinja soveltuu varsinkin suuremmille hybridiasteille esimerkiksi täyshybridille, ladattavalle hybridille ja pidennetyn kantaman hybridille. Ratkaisua voidaan käyttää myös kevythybrideille, mutta vasta suuremmalla hybridiasteella kytkimen sijainnin tuoma mahdollisuus täyssähköiseen ajamiseen tulee esille. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)



Kuva 4. Rinnakkaishybridivoimansiirto yhdellä akselilla (mukaillen Wu ym., 2015).

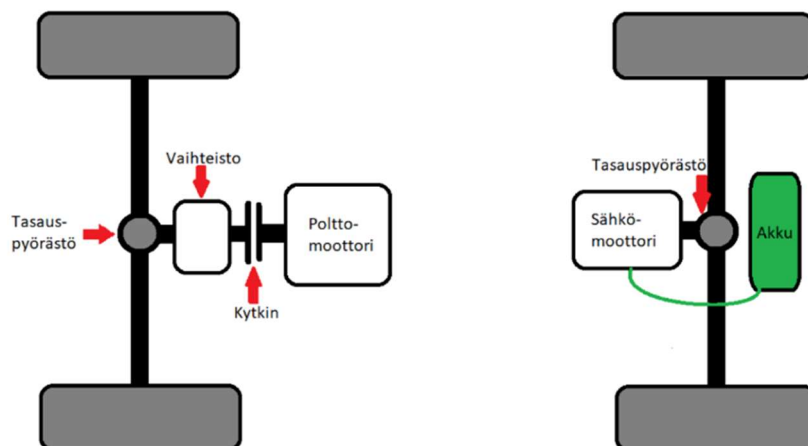
Kuvassa 5 esitetään kuvan 4 kaltainen voimalinja, mutta sähkömoottori sijaitsee ennen vaihteistoa. Englannin kielessä kuvan 4 voimalinjaa kutsutaan pre-transmission ja kuvan 5 voimalinjaa post-transmission, jolla viitataan sähkömoottorin sijaintiin, joko ennen tai jälkeen vaihteiston. Sähkömoottorin ollessa vaihteiston jälkeen (kuva 5), on sähkömoottori yhteydessä renkaisiin kiinteällä välityksellä. Tämä tuo korkeita vaatimuksia käytettävälle sähkömoottorille, jossa täytyy olla suuri kierrosnopeusalue. Lisäksi sähkömoottorin taloudellisuuteen vaikuttaa vahvasti ajonopeus. Toisaalta kuvan 5 voimalinja mahdollistaa jatkuvan vedon renkaille myös vaihteen vaihdon aikana.

Kuvan 5 voimalinja soveltuu kuvan 4 voimalinjan kanssa samoille hybridiasteille. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)



Kuva 5. Rinnakkaishybridivoimansiirto yhdellä akselilla (mukaillen Wu ym., 2015).

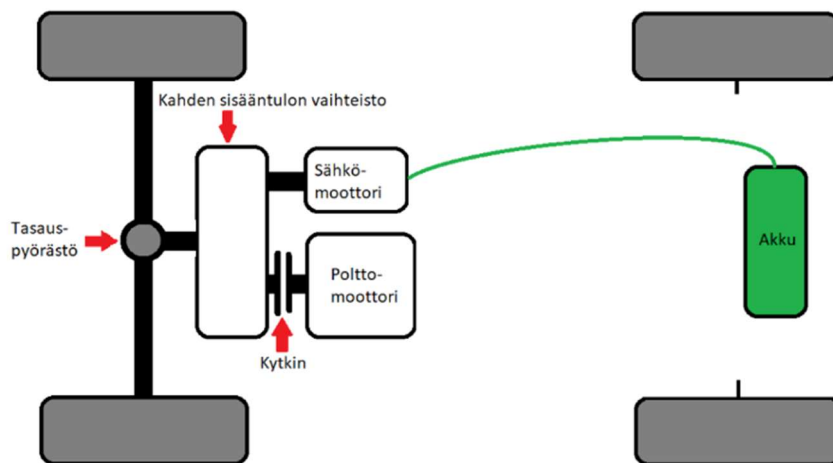
Kuvassa 6 esitellään moottoreiden sijoitus omille akseleille. Tällaisella voimansiirrolla saadaan autosta nelivetoinen, ilman akseleiden välistä kardaniakselia. Ratkaisu antaa myös enemmän tilaa sähkömoottorin sijoitukselle. Kuvassa sähkömoottori on kiinnitetty akselille kiinteällä välityksellä, mutta on myös mahdollista sijoittaa vaihteisto sähkömoottorin ja renkaiden välille. Tällöin puhuttaisiin voimansiirron toteuttamisesta kahdella vaihteistolla. Kuvan 6 voimalinja antaa hyvät mahdollisuudet sähköiseen liikkumiseen oman sähköisen voimalinjan ansiosta ja sopiikin siten korkean hybridiasteen omaaville hybridiautoille. (Wu ym., 2015)



Kuva 6. Rinnakkaishybridivoimansiirto eri akseleilla (mukaillen Wu ym., 2015).

Rinnakkaishybridi voidaan myös toteuttaa esimerkiksi kahdella sähkömoottorilla ja polttomoottorilla. Tällaisessa voimalinjassa yhdistyy kuvien 3–5 mukainen vetävä akseli ja toisella akselilla on kytkettynä kuvan 6 mukainen sähkömoottori. Tällainen ratkaisu voi samaan aikaan tukea polttomoottoria ja toimia omana voimanlähteenä toisella akselilla. Myös nelivetoinen täysin sähköinen ajaminen on näin mahdollista.

Toinen hieman harvinaisempi rinnakkaishybridin toteutustapa on käyttää kahden sisääntulon vaihteistoa. Tällainen voimalinja esitellään kuvassa 7. Kahden sisääntulon vaihteistossa molemmat voimanlähteet tuottavat tehoa erillään yhdelle akselille. Tämä on toteutettu yleensä niin, että sähkömoottorilla on kiinteä välityssuhde tai 2 vaihdetta ja polttomoottorilla oma vaihteisto. Näin ollen sähkömoottori pitää huolen, että myös polttomoottorin vaihtenvaihtojen aikana voidaan renkailla välittää tehoa. Kuvan 7 voimalinjassa yhdistyy kuvien 4 ja 5 voimalinjojen hyödyt. Kahden sisääntulon vaihteisto yhdistää sähkömoottorin kiinteän välityssuhteen tai pienen vaihteiston ja polttomoottorin vaihteiston yhteen pakettiin. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)



Kuva 7. Rinnakkaishybridivoimansiirto kahden sisääntulon vaihteistolla (mukaillen Wu ym., 2015).

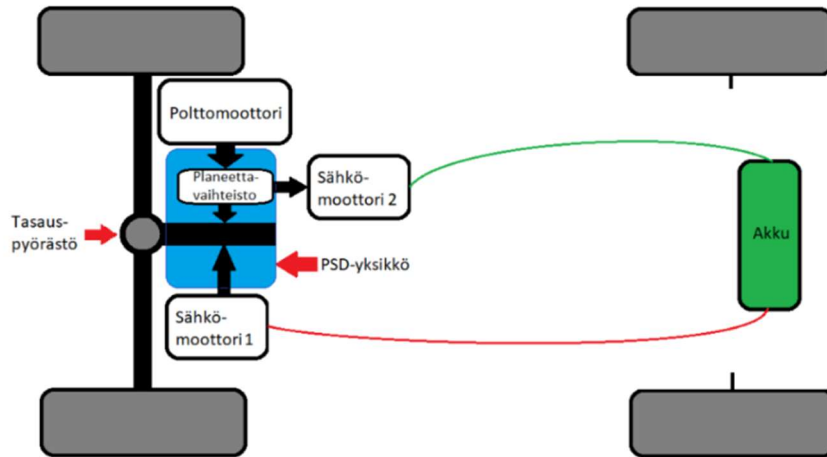
4.4 Yhdistelmähybridi

Yhdistelmähybridissä yhdistyy sarjahybridi ja rinnakkaishybridi. Yhdistelmähybridissä voimalinjan toimintaa ohjataan PSD-yksiköllä, jonka nimi tulee englannin kielen sanoista Power-split device. PSD-yksikkö sisältää planeettavaihteiston tai planeettavaihteistoja, joiden avulla tehoa jaotellaan sisääntuloporttien ja ulostuloporttien välillä. Planeettavaihte sisältää kolme pääkomponenttia; aurinkopyörän, planeettapyörän ja kehäpyörän. Näiden komponenttien välistä nopeuseroa voidaan säädellä. Yhdistelmähybridin pääkomponentit tasauspyörästön ja vetoakselin lisäksi ovat polttomoottori, kaksi sähkömoottoria ja PSD-yksikkö.

Yhdistelmähybridi soveltuu hybridiasteeltaan täyshybridille ja sitä suuremmille hybridiasteille, koska planeettavaihteistojen käyttö asettaa sähkömoottoreille vaatimuksia vääntömomentin suuruuden suhteen. Polttomoottorin tehoa välitetään myös planeettavaihteiston avulla, joka mahdollistaa polttomoottorin kierrosnopeuden pitämisen optimaalisella alueella taloudellisuuden kannalta. Yhdistelmähybridit voidaan jaotella sen perusteella, miten PSD-yksikön sisääntuloja ja ulostuloja jaotellaan planeettavaihteiston tai planeettavaihteistojen avulla.

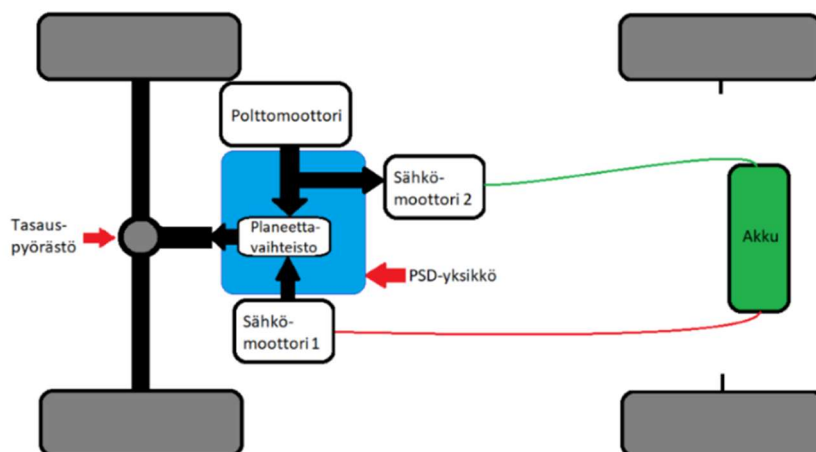
Kuvissa 8–10 esitellään kolme yleistä yhdistelmähybridin voimansiirtoasetelmaa, joita kutsutaan englannin kielessä sanoilla Input-split, Output-split ja Compound-split. Kuvissa polttomoottori ja sähkömoottori 1 tuottavat tehoa renkaille. Sähkömoottori 2 toimii generaattorina polttomoottorin pyörimisliikkeestä suoraan tai planeettavaihteiston välityksellä. Mustalla paksulla viivalla kuvataan mekaanista yhteyttä komponenttien välillä, ja nuolen suunta kertoo mistä mihin pyörimisliikettä välitetään. Kuvissa vihreä ohut viiva kuvastaa sähkövirran suunnan akustolle päin ja punainen ohut viiva sähkövirran suunnan akustolta poispäin. PSD-yksikkö koostuu yhdestä tai kahdesta kolmeporttisesta planeettavaihteistosta. (Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

Kuvassa 8 esitellään Input-split yhdistelmähybridi. Input-split yhdistelmähybridissä polttomoottorilta PSD-yksikölle tuleva teho jaetaan planeettavaihteiston avulla tarpeen mukaan sähkömoottori 2:lle ja voimansiirtoon renkaille. Sähkömoottori 2 toimii generaattorina, josta sähkövirtaa välitetään akun kautta sähkömoottori 1:lle. Sähkömoottori 1 on yhdistettynä suoraan voimansiirtoon renkaille. Input-split hybridin vahvuus on erityisesti taloudellisuus matalissa nopeuksissa. (Wu ym., 2015)



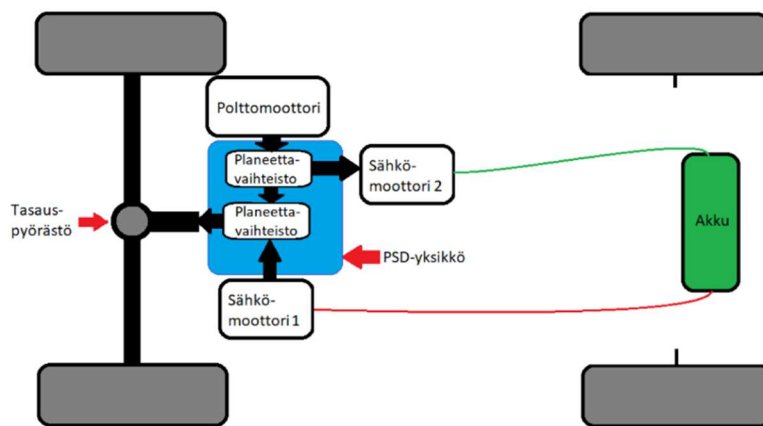
Kuva 8. Yhdistelmähybridivoimansiirto (mukaillen Wu ym., 2015).

Kuvassa 9 esitellään Output-split yhdistelmähybridi. Output-split yhdistelmähybridissä polttomoottorin ja sähkömoottori 1:n teho yhdistetään planeettavaihteistolla voimansiirtoon renkaille. Sähkömoottori 2 toimii generaattorina ja on kytkettynä mekaanisesti polttomoottorin kampiakselille. Output-split yhdistelmähybridi ei yllä Input-split yhdistelmähybridin tasolle taloudellisuudessa matalissa nopeuksissa, mutta nopeuden kasvaessa sen taloudellisuus nousee Input-split yhdistelmähybridin yläpuolelle. (Wu ym., 2015)



Kuva 9. Yhdistelmähybridivoimansiirto (mukaillen Wu ym., 2015).

Kuvassa 10 esitellään Compound-split yhdistelmähybridi. Compound-split yhdistelmähybridissä yhdistyy Input-split ja Output-split tekniikat. Toteutukseltaan tästä syystä monimutkaisempi ja kalliimpi ratkaisu. Compound-split yhdistelmähybridissä sisään tuleva polttomoottorin pyörimisliike jaetaan sähkömoottori 2:n ja voimansiirtoon kytketyn planeettavaihteiston välillä Input-split yhdistelmähybridin mukaisesti. Voimansiirtoon kytketyn planeettavaihteiston toiseen sisääntuloon on kytkettynä sähkömoottori 1. Tämä planeettavaihteisto yhdistää sisääntulojen tehon voimansiirtoon renkaille. (Wu ym., 2015)



Kuva 10. Yhdistelmähybridivoimansiirto (mukaillen Wu ym., 2015).

Compound-split tekniikka antaa yhdistelmähybrideistä laajimmat mahdollisuudet erilaisiin ajotiloihin, mutta toisaalta vaatii myös monimutkaisimman ohjauslogiikan. Ohjauslogiikan puolesta Input-split tekniikka on yksinkertaisin toteuttaa ja siksi Input-split onkin käytetyin yhdistelmähybriditekniikka. Output-split tekniikka vaatii monimutkaisemman ohjauslogiikan verrattuna Input-split tekniikkaan. Ohjattavia komponentteja on kuitenkin vähemmän kuin Compound-split tekniikkaa hyödyntävissä yhdistelmähybrideissä. (Wu ym., 2015)

5 ENERGIAN VARASTOINTI AKULLE

Hybridiautotekniikkaan kuuluu olennaisesti ratkaisut energian talteenottoon ja sen hallintaan. Hybridiasteesta riippumatta sähköenergian varastoiminen akustolle on yksi suurimmista kehityskohteista akkujen kehittämisen rinnalla. Etenkin itselatautuvien HEV-hybridien kannalta sähköenergian talteenotolla on ratkaiseva merkitys sähköisen voimalinjan käytettävyyteen. Myös PHEV-hybrideissä ja EREV-hybrideissä käytetään ulkoisen latausmahdollisuuden lisäksi energian varastointiin liittyviä ratkaisuja pidentääkseen akun varauksen kestoa.

Yleisimmät sovellutukset sähköenergian talteenottoon ovat polttomoottorin pyörimisliikkeen muuntaminen generaattorilla sähköenergiaksi ja hidastavan auton liikeenergian muuntaminen sähköenergiaksi. (Vinot & Trigui, 2013; Xue ym., 2020)

5.1 Polttomoottorin hyödyntäminen sähköenergian tuottamisessa

Polttomoottorin pyörimisliikettä hyödynnetään akkujen latauksessa laajasti. Yksinkertaisimmillaan tämä voidaan toteuttaa hybridiautoissa polttomoottoriautojen kaltaisella hihnavetoisella laturilla. Laturi saa pyörimisliikkeensä polttomoottorin kampiakselilta moniurahihnalla. Tällaista ratkaisua käytetään mikrohybrideissä.

Energiatehokkuuden parantamiseksi ja sähköisen avustuksen lisäämiseksi laturi voidaan korvata 48 V jännitettä käyttävällä sähkömoottorilla. Tällaisesta hihnavetoisesta lataus- ja avustusjärjestelmästä käytetään yleisesti lyhennettä BSG, joka tulee englannin kielen sanoista Belt-alternator Starter Generator. BSG-järjestelmällä akustoa voidaan ladata hyödyntämällä polttomoottorin pyörimisliikettä tai avustaa polttomoottorin pyörimisliikettä akustoon kerätyllä sähkövirralla. Tällaista energiantalteenottoratkaisua käytetään kevythybrideissä.

Kun halutaan BSG-tekniikkaa kestävämpi ja huoltovapaampi ratkaisu voidaan sähkömoottori sijoittaa suoraan polttomoottorin kampiakselille polttomoottorin ja voimansiirron välille. Tällaisesta ratkaisusta käytetään lyhennettä ISG, joka tulee englannin kielen sanoista Integrated Starter Generator. ISG-järjestelmä mahdollistaa tehokkaamman sähkömoottorin käytön verrattuna BSG-järjestelmään ja siten sitä käytetäänkin korkeammille hybridiasteille. ISG-tekniikkaa voidaan käyttää

kevythybrideihin ja siitä korkeampiin hybridiasteisiin. Tehokkaamman sähkömoottorin käyttö ja sähkömoottorin sijoitus polttomoottorin ja vaihteiston välille nostavat ISG-järjestelmän kustannukset huomattavasti BSG-järjestelmää korkeammiksi.

BSG- ja ISG-tekniikoissa osa polttomoottorin tehosta käytetään sähkömoottorin pyörittämiseen ladattaessa akkuja. On myös mahdollista käyttää polttomoottoria ainoastaan sähkömoottorin pyörittämiseen, kuten EREV-hybrideissä. Tällöin polttomoottori ei ole kytkettynä voimasiirtoon, vaan käyttää tuottamansa tehon kokonaisuudessaan generaattorin pyörittämiseen. (Husain, 2011; Wu ym., 2015; Xue ym., 2020)

5.2 Jarrutusenergian talteenotto

Sähkömoottoreiden käyttäminen voimansiirrossa mahdollistaa auton liike-energian muuttamisen osittain sähköiseksi energiaksi. Sähkömoottorin kykyyn varastoida auton liike-energiaa vaikuttaa keskeisesti sähkömoottorin sijoittelu ja tehokkuus. Käytännössä energian muuntaminen liike-energiasta sähköiseksi energiaksi tapahtuu sähkömoottorin toimiessa generaattorina, jolloin auton nopeus hidastuu ilman auton jarrujen käyttöä. Mitä tehokkaampi sähkömoottori on, sitä nopeammin autoa voidaan hidastaa ilman jarrujen käyttöä.

Jarrutusenergian talteenotto voidaan toteuttaa kahdenlaisella ohjauslogiikalla. Generaattori voidaan käynnistää, kun kaasupoljinta ei paineta, jolloin auto hidastuu hieman normaalia rullausta nopeammin. Toinen monimutkaisempi, mutta tehokkaampi tapa on yhdistää jarrut ja generaattori toimimaan rinnakkain erillisellä ohjauslogiikalla. Tällöin kevyesti jarrupoljinta painettaessa ainoastaan generaattori kytkeytyy päälle hidastamaan vauhtia. Jarrupoljinta painettaessa enemmän generaattorin tehoa nostetaan, kunnes sähkömoottorin maksimiteho on saavutettu ja sen jälkeen vasta itse jarrut kytkeytyvät päälle.

Mitä nopeammin hidastuva auton liike on, sitä haastavampi on kerätä isoa osaa liike-energiasta sähköenergiaksi. Tämä johtuu siitä, että nopeuden hidastuessa nopeasti henkilöauton painoisella kappaleella sähkömoottorin tehokkuus ei riitä varastoimaan kuin murto-osan energiasta. Näin ollen jarrutusenergiaa saadaankin parhaiten talteen kevyissä

ja tasaisissa jarrutuksissa. Jarrutusenergian talteenotto on lataustapahtumana varsin lyhytaikainen, mutta toisaalta myös todella tehokas. (Husain, 2011; Wu ym., 2015)

Etenkin pienen hybridiakun omaavat hybridit voivat täyttää useita prosentteja akun kapasiteetista jo yhdellä jarrutuksella. Esimerkkinä Audin kevythybridi voi varastoida jarrutusenergiaa parhaimmillaan 8 kW teholla ja hybridiakun koko on 0,5 kWh (Granström, 2019). Tällöin hybridiakku latautuu tyhjästä täyteen täydellä jarrutusenergian talteenottonopeudella 225 sekunnissa eli vajaassa neljässä minuutissa. Tämä tarkoittaa, että yhdellä noin 10 sekunnin jarrutuksella akun kapasiteetista voidaan täyttää noin 5 %.

6 POHDINTA

Tässä osiossa pyritään vertailemaan aiemmin esitettyjä hybridiasteita ja vertailemaan hybridivoimanlähteitä sähkö- ja polttomoottoriautojen kanssa. Tämän lisäksi hybridiautojen suosion kasvulle haetaan perusteita autovalmistajien ja kuluttajien näkökulmasta. Kappaleessa 6.3 esitellään esimerkkilaskelmia erilaisille hybridi- ja polttomoottoriautoille käyttökulujen osalta vuositasolla. Vuositasolla ilmenevistä käyttökuluista huomioidaan käyttövoimavero ja polttoaine- ja sähkökustannukset. Näin ollen muun muassa määräaikaishuoltojen kustannukset rajautuvat tarkastelun ulkopuolelle.

6.1 Hybridiasteiden vertailu

Kuvassa 11 on yhteenvetona jokaiselle hybridiasteelle ominaisia tietoja liittyen sähkömoottorin kokoon, akun kapasiteettiin, hybridijärjestelmän käyttöjännitteeseen, sähköenergian varastointiin, hybridijärjestelmän mahdollistamiin toimintoihin, hybridijärjestelmän tuomaan hyötyyn polttoaineenkulutuksessa ja esimerkkiautoja, joita on käytetty tiedonlähteinä.

Kuvasta 11 nähdään mikrohybridin olevan komponenteiltaan ja toiminnalta lähellä tavallista polttomoottoriautoa. Polttomoottoriautoon verrattaessa mikrohybridissä ei ole juuri ollenkaan omaa hybridijärjestelmää. Mikrohybridi mahdollistaa ainoastaan start-stop-järjestelmän käyttämisen, jonka hyöty polttomoottoriautoon verrattuna on hyvin pieni.

Mikrohybridistä mentäessä hybridiaste ylemmäs kevythybridiin tulee mukaan polttomoottorin lisäksi toinenkin voimanlähde ja sille oma hybridijärjestelmä. Kevythybridin sähkömoottori on pienitehoinen, mutta se mahdollistaa moottorin avustamisen ja jarrutusenergian talteenoton. Näillä keinoilla kevythybridin hyöty polttoaineenkulutukseen on selvästi mikrohybridiä parempi.

Kuvasta 11 nähdään, että sähkömoottorin tehon kasvaessa kevythybridin ja täyshybridin välillä selvästi, nousee myös taloudellinen hyöty polttoaineenkulutuksessa merkittävästi. Sähkömoottorin tehon nousu perustuu olennaisesti hybridijärjestelmän käyttöjännitteen nostamiseen. Itselatautuvissa hybrideissä eli mikrohybridissä, kevythybridissä ja

täyshybridissä hybridiakkujen kapasiteetti ei kuitenkaan merkittävästi nouse sähkömoottorin tehon ja käyttöjännitteen kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että ilman ulkoista latausmahdollisuutta hybridijärjestelmän akun ei tarvitse olla kovin suuri.

Täyshybridin ja ladattavan hybridin välillä sähkömoottorin teho ja käyttöjännite ovat melkein samalla tasolla. Ladattavalla hybridillä saavutettava selvästi täyshybridia parempi taloudellinen hyöty polttoaineenkulutuksessa perustuu akun kapasiteetin kasvattamiseen. Suurempi akkukapasiteetti mahdollistaa polttomoottorin pitämisen sammutettuna huomattavasti kauemmin. Toisaalta suuri akkukapasiteetti vaatii myös ulkoista latausta, jotta se saadaan täytettyä.

Ladattavien ja pidennetyn kantaman hybridien välillä erot ovat pieniä. Ainut suurempi ero on, että ladattavissa hybrideissä voidaan käyttää pienitehoisempia sähkömoottoreita, sillä polttomoottorilla voidaan antaa lisätehoa aina tarvittaessa. Tästä poiketen pidennetyn kantaman hybrideissä keskitytään sähköiseen voimalinjaan, jolloin sähkömoottorit ovat mitoitettu riittämään yksinään voimantuottoon renkaille.

	Mikrohybridi	Kevythybridi	Täyshybridi	Ladattava hybridi	Pidennetyn kantaman hybridi
Toinen voimanlähde:	-	Sähkömoottori 2-10 kilowattia	Sähkömoottori 30-105 kilowattia	Sähkömoottori 45-135 kilowattia	Sähkömoottori 110-125 kilowattia
Akun kapasiteetti:	Käyttää yleensä polttomoottoriauton omaa akkua	0,5-1 Kilowattituntia	1,5-2 Kilowattituntia	8-20 Kilowattituntia	15-35 Kilowattituntia
Hybridi sähköjärjestelmän käyttöjännite:	12 voltia	12-48 voltia	Noin 300 voltia	Noin 300 voltia	Noin 300 voltia
Sähköenergian varastointi akulle:	Hihnavetoinen laturi.	Sähkömoottori generaattorina polttomoottorin käydessä ja jarrutusenergian talteenotto	Sähkömoottori generaattorina polttomoottorin käydessä ja Jarrutusenergian talteenotto	Sähkömoottori generaattorina polttomoottorin käydessä, jarrutusenergian talteenotto ja Ulkoinen lataus	Polttomoottori toimii generaattorina, jarrutusenergian talteenotto ja Ulkoinen lataus
Hybridijärjestelmän mahdollistamat toiminnot:	Start-stop-järjestelmä	Start-stop-järjestelmä moottorin sammuttamisella vauhdissa ja pieni hetkellinen polttomoottorin avustus liikkeessä	Polttomoottorin sammutus rauhallisessa ajossa, vahva hetkellinen polttomoottorin avustus liikkeessä ja lyhyt täysin sähköinen ajaminen	Polttomoottorin sammutus rauhallisessa ajossa, vahva polttomoottorin avustus liikkeessä ja 40-70km täyssähköinen kantama.	Vahva sähköinen voimalinja ja pääsääntöisesti sähköinen liikkuminen
Hybridijärjestelmän tuoma hyöty polttoaineen kulutukseen:	2-4 %	8-11 %	20-35 %	50-60 %	Yli 60 %
Esimerkkiautoja:	Kaikki start-stop-järjestelmällä varustetut polttomoottoriautot	Audi A4 40TFSI MHEV, Audi S4 MHEV, Mercedes-Benz C 200 EQ-Boost, Kia sportage 2,0 CRDi SCR Mild-hybrid,	Toyota RAV4 Hybrid, Kia Niro 1,6 GDI Hybrid, Hyundai IONIQ Hybrid, LEXUS Nx 300h AWD	Audi A6 55TFSI e, BMW 530e, Mercedes-Benz E 300 de EQ-Power, Volvo V90 T6 TwE, Toyota RAV4 Plug-in Hybrid, Kia Niro 1,6 GDI Plug-In Hybrid	BMW i3 94 Ah Range Extender, Opel Ampera

Kuva 11. Hybridiasteet tiivistetysti.

6.2 Vertailua hybridi-, sähkö- ja polttomoottoriautojen välillä

Hybridivoimanlähteet ovat kovassa nousussa ja siihen perimmäiset syyt piilevät hiilidioksidipäästöjen laskemisessa. Hybridiautot eivät ole päästöttömiä, mutta niiden hiilidioksidipäästöt ovat kuitenkin polttomoottoriautoa pienemmät. Hybridiautoilla saadaan liikenteen päästöjä laskettua merkittävästi, mutta vasta täyssähköisillä autoilla voidaan päästä hiilineutraaliin liikkumiseen. Tähän ei kuitenkaan tulla pääsemään vielä pitkään aikaan, joten hybridiautot toimivat hyvänä väliratkaisuna. Hiilineutraaliin liikkumiseen voidaan katsoa kuuluvaksi myös hiilineutraalin sähköenergian tuottaminen. Sähköenergian tuotannon päästöihin ei tässä työssä kuitenkaan perehdytä.

Hybridiautojen määrän lisääntymistä voidaan tarkastella autovalmistajien ja kuluttajien näkökulmasta. Tässä työssä tarkastellaan autovalmistajia Euroopan sisältä ja kuluttajia Suomessa.

Autovalmistajien näkökulmasta EU:n (Euroopan Unionin) määräämät pakotteet hiilidioksidipäästöjen laskemiseksi ovat johtaneet hybridi- ja sähköautojen kehittämiseen ja nopeasti kasvaviin valmistusmääriin. Vuonna 2012 Euroopan komissio teki linjauksen, jonka mukaan 2020 alkaen autonvalmistajien automallien keskimääräiset hiilidioksidipäästöt täytyy olla alle 95 g/km. Tästä eteenpäin 2025 keskimääräisiä hiilidioksidipäästöjä täytyy vähentää vuoden 2020 lukemiin verrattuna 15 % ja 2030 mennessä jo 37,5 % verrattuna 2020 lukemiin. Vertailuarvona päästölukemiin vuonna 2009 rekisteröityjen autojen keskimääräiset hiilidioksidipäästöt olivat 146 g/km. (Nieminen, 2019)

On selvää, ettei polttomoottoriautoilla päästä tuleviin päästörajoitteisiin, eikä täyssähköautoja saada vielä liikenteeseen tarpeeksi päästökeskiarvojen pienentämiseksi yksistään. Täyssähköautojen yleistymistä hidastaa akkujen kehitys ja latausinfrastruktuurin kehityksen hitaus. Näin ollen hybridiautot toimivat kelvollisena ratkaisuna päästövähennyksiin. Etenkin ladattavien hybridien hiilidioksidipäästöt ovat WLTP-mittausluokassa todella alhaisia, yleisesti alle 50 g/km (Koistinen, 2020).

Kuluttajien näkökulmasta Suomessa verotuksella yritetään ohjata polttomoottoriauton sijasta vähäpäästöisempiin hybridi- ja sähköautoihin. Verrattaessa polttomoottoriauttoa ja hybridiauttoa, on hybridiauton veroton hinta yleisesti korkeampi. Tämä johtuu siitä, että hybridiauto sisältää polttomoottorin ohella toisen voimanlähteen, jonka komponentit nostavat auton hintaa. Suomessa autovero on merkittävä osa auton kokonaishinnasta ja se määräytyy muun muassa päästöjen perusteella. Näin ollen vähäpäästöiset autot, kuten hybridiautot ovat pienen autoveron myötä kokonaishinnoiltaan kilpailukykyisiä polttomoottoriautoihin verrattuna. Kun hybridi- ja polttomoottoriautojen ostohinta saadaan samalle tasolle, on hybridiauton hankinta järkevää. Hybridiauton käyttökuluissa säästää verrattuna polttomoottoriautoon, sillä vähentyneen polttoaineenkulutuksen lisäksi myös vuosittainen käyttövoimavero on alhaisten päästöjen vuoksi matalampi.

6.3 Esimerkkilaskelmia hybridi- ja polttomoottoriautojen kuluista

Kuluttajien autonvalintapäätökseen vaikuttaa vahvasti auton käyttökulut vuositasolla. Vuosittaisia käyttökuluja ovat muun muassa vakuutukset, ajoneuvovero, määräaikaishuollot ja polttoaine- ja sähkökulut. Vakuutukset määräytyvät usein auton omistajan tietojen ja automallin kolaritietojen perusteella. Näin ollen auton voimanlähteen tyypillä ei ole vaikutusta vakuutusten hintoihin. Tästä syystä vakuutuksia ei oteta huomioon käyttökuluvertailussa. Toinen käyttökulu, jota ei huomioida on määräaikaishuollot. Autojen huoltoväli ja varaosien kustannukset ovat hyvin pitkälti autovalmistajasta ja automallista riippuvaisia.

Määräaikaishuollot hybridi- ja polttomoottoriautoille suoritetaan pääosin saman mittaisella huoltovälillä. Käytännössä hybridijärjestelmän sisältämä sähkömoottori ja akku ovat lähes huoltovapaita. Huoltosuunnitelma on tämän myötä hyvin pitkälti polttomoottoriauton kaltainen. Hybridiautojen huoltoon on kuitenkin autoja huoltavien yritysten varauduttava, sillä korkeajännite sähköjärjestelmät täytyy tehdä jännitteettömiksi ennen huollon aloittamista.

Huoltoon ja varaosien hintaan hybridiautoissa liittyy yleisesti pelkoja kuluttajissa. Suurin huolenaihe on hybridiautojen akkujen hinnat ja akuston kestäminen. Tähän useat autovalmistajat ovat kuitenkin reagoineet lupaamalla pitkän takuun akustolle, joka on esimerkiksi Toyotalla 10 vuotta/350 tkm (Toyota Auto Finland Oy, 2021). Pitkällä takuulla pyritään lisäämään luottamusta hybridijärjestelmiin ja niiden kestävyYTEEN.

Kuvissa 12–15 esitellään erityyppisten autojen kustannusvertailuja polttoaine- ja sähkökustannusten ja vuosittaisen käyttövoimaveron pohjalta. Taulukoihin on kerätty vertailukelpoisia autoja pareittain, jotta vertailu keskenään onnistuu paremmin. Kuvassa 12 esitellään Toyota Rav4-automallista kaksi versiota bensiinimoottorilla ja täyshybridinä. Kuvassa 13 vertailuparina on Kia Niro kaksi eri mallia täyshybridinä ja ladattavana hybridinä. Kuvassa 14 on kaksi business-luokan ladattavaa hybridiä, joiden suurimpana erona on käytettävä polttoaine. Kuvassa 15 vertailuparina on kaksi isokokoista ja tehokasta Audia hybridivoimanlähteellä ja bensiinimoottorilla.

Vuosittaiset kustannukset on laskettu 10 tkm, 15 tkm, 20 tkm ja 25 tkm vuosittaiselle kilometrimäärälle. Bensiinin hintana käytetään 1,5 €/l, dieselin hintana 1,4 €/l ja sähkön hintana 0,15 €/kWh. Käytännössä polttoaineiden ja sähkön hinta vaihtelevat ajan ja

paikan mukaan, joten tulokset ovat vain suuntaa antavia. Polttomoottoreiden kulutuksena käytetään valmistajan ilmoittamaa yhdistettyä kulutusta. Ladattavien hybridien ulkoisen latauksen sähkönkulutuksena käytetään tilannetta, jossa akku ladataan täyteen aina 100 km välein. Latausväli on siis tiheä, mutta vasta sillä päästään lataushybridien ilmoitettuun polttomoottorin kesikilutukseen. Käytännössä sähkön- ja polttoaineen kulutuksen suhde voi vaihdella laajasti käytettävien ajotilojen välillä.

6.3.1 Polttomoottori- ja täyshybridiauto kustannusvertailussa

Kuvassa 12 esitellään Toyota Rav4-automallin voimanlähteiden välisiä eroja ja kustannuksia. Kuvasta nähdään täyshybridiauton yhdistetyn kulutuksen olevan 1,4 l/100 km matalampi verrattaessa polttomoottoriautoon. Päästöjen vähentyessä myös käyttövoimavero on alhaisempi täyshybridissä. Alhaisemman kulutuksen ja käyttövoimaveron myötä on selvää, että täyshybridin vuosikulut ovat pienemmät jokaisella lasketulla kilometrimäärällä. (Toyota Auto Finland Oy, 2021; Liikenne- ja viestintävirasto)

	Toyota Rav 4 2,5 Hybrid 2021	Toyota Rav 4 2,0 VVT-iE 2021
Voimanlähde	Bensiini+sähkömoottori	Bensiinimoottori
Hybridiasete	Täyshybrid	-
Hybriditeknikka	Yhdistelmähybrid	-
Auton kokonaisteho [kW]	160	129
Hybridiakun kapasiteetti [kWh]	1,6	-
Polttomoottorin keskilutus [l/100km]	5,6	7
Käyttövoimavero [€/vuosi]	162,42	218,27
Laskuissa käytetyt polttoaine- ja sähköhinnat: Bensiini (E95)=1,5€/l, Diesel= 1,4 €/l, Sähkö= 0,15 €/kWh		
Vuosikustannukset (10 tkm) [€]	1002,42	1268,27
Vuosikustannukset (15 tkm) [€]	1422,42	1793,27
Vuosikustannukset (20 tkm) [€]	1842,42	2318,27
Vuosikustannukset (25 tkm) [€]	2262,42	2843,27

Kuva 12. Toyota Rav4 polttomoottori- ja täyshybridiauto kustannusvertailussa.

6.3.2 Täyshybridi ja ladattava hybridi kustannusvertailussa

Kuvassa 13 esitellään Kia Niro automallista täyshybridi ja ladattava hybridi versiot. Molemmista autoissa käytetään samaa polttomoottoria sähkömoottorin rinnalla. Taulukosta on nähtävissä yleiset täyshybridin ja ladattavan hybridin erot. Näitä eroja ovat muun muassa ladattavan hybridin hieman tehokkaampi sähkömoottori, huomattavasti suurempi akkukapasiteetti ja näiden ansiosta pienempi polttomoottorin kulutus. Kustannuslaskelmista voidaan todeta, että ladattava hybridi tulee huomattavasti halvemmaksi ja ero kasvaa vain ajettaessa vuoden aikana enemmän. (Kia Motors Finland Oy, 2020; Liikenne- ja viestintävirasto)

	Kia Niro 1,6 GDI Hybrid 2020	Kia Niro 1,6 GDI Plug-In Hybrid 2020
Voimanlähde	Bensiini+sähkömoottori	Bensiini+sähkömoottori
Hybridiaste	Täyshybridi	Ladattava hybridi
Hybriditekniikka	rinnakkaishybridi	rinnakkaishybridi
Polttomoottorin suurin teho [kW]	77,2	77,2
Sähkömoottorin suurin teho [kW]	32	44,5
Auton kokonaisteho [kW]	103,6	103,6
Hybridiakun kapasiteetti [kWh]	1,56	8,9
Polttomoottorin kesikukulutus [l/100km]	4,8	1,4
Ulkoisen latauksen sähkönkulutus [kWh/100km]	-	8,9
Käyttövoimavero [€/vuosi]	106,21	106,21
Laskuissa käytetyt polttoaine- ja sähköhinnat: Bensiini (E95)=1,5€/l, Diesel= 1,4 €/l, Sähkö= 0,15 €/kWh		
Vuosikustannukset (10 tkm) [€]	826,21	449,71
Vuosikustannukset (15 tkm) [€]	1186,21	621,46
Vuosikustannukset (20 tkm) [€]	1546,21	793,21
Vuosikustannukset (25 tkm) [€]	1906,21	964,96

Kuva 13. Kia Niro hybrid ja plug-in hybrid kustannusvertailussa.

6.3.3 Ladattavien hybridien vertailu eri polttoaineilla

Kuvassa 14 vertaillaan BMW:n ja Mercedes-Benzin lataushybridejä. Voimanlähteiden suurin ero on polttomoottorien välillä. BMW:n lataushybridissä voimanlähteinä ovat bensiini- ja sähkömoottori, kun taas Mercedes-Benzin lataushybridissä voimanlähteinä toimivat diesel- ja sähkömoottori. Käyttökuluja ajatellen dieselmoottorin kulutus on hieman polttomoottoria alhaisempi ja dieselin litrahinta on bensiinin litrahintaa alhaisempi. Suurin ero käyttökustannuksiin tulee kuitenkin käyttövoimaverosta, joka on puolestaan diesel- ja sähkömoottorin yhdistelmässä korkea. Dieselmoottorin aiheuttama korkea käyttövoimavero on sen verran suuri, ettei muuten hieman taloudellisempi Mercedes-Benz saa BMW:tä kiinni vuosittaisissa kustannuksissa edes 25 tkm vuosittaisella ajolla. (Koistinen, 2020)

	BMW 530e 2020	Mercedes-Benz E 300 de EQ-Power 2020
Voimanlähde	Bensiini+sähkömoottori	Diesel+sähkömoottori
Hybridiaste	Ladattava hybridi	Ladattava hybridi
Hybriditekniikka	rinnakkaishybridi	rinnakkaishybridi
Polttomoottorin suurin teho [kW]	135	143
Sähkömoottorin suurin teho [kW]	80	90
Auton kokonaisteho [kW]	215	225
Hybridiakun kapasiteetti [kWh]	12	13,5
Polttomoottorin kesikilutus [l/100km]	1,7	1,4
Ulkoisen latauksen sähkönkulutus [kWh/100km]	12	13,5
Käyttövoimavero [€/vuosi]	47,45	518,67
Laskuissa käytetyt polttoaine- ja sähköhinnat: Bensiini (E95)=1,5€/l, Diesel= 1,4 €/l, Sähkö= 0,15 €/kWh		
Vuosikustannukset (10 tkm) [€]	482,45	917,17
Vuosikustannukset (15 tkm) [€]	699,95	1116,42
Vuosikustannukset (20 tkm) [€]	917,45	1315,67
Vuosikustannukset (25 tkm) [€]	1134,95	1514,92

Kuva 14. Business-luokan ladattavat hybridit kustannusvertailussa.

6.3.4 Tehokas hybridi- ja polttomoottoriauto kustannusvertailussa

Kuvassa 15 esitellään kaksi Audin mallia, joita yhdistää suuren fyysisen koon lisäksi suuri kokonaisteho. Audin A6 55TFSIe malli on lataushybridi ja voimanlähteinä toimivat 185 kW tehoinen bensiinimoottori ja 105 kW tehoinen sähkömoottori. Hybridivoimalinja on toteutettu rinnakkaishybridinä ja järjestelmän kokonaisteho on 270 kW. Audi sQ5 mallissa voimanlähteenä toimii bensiinimoottori, jonka huipputeho on 260 kW. Voimantuoton perusteella voimalähteet ovat suurin piirtein samalla viivalla, mutta käyttökuluissa hybridivoimanlähteen tuomat taloudelliset hyödyt ovat valtavat. Lataushybridin polttoaineenkulutus on vain 1,8 l/100 km, kun vastaavasti polttomoottoriauton kulutus on huimat 8,5 l/100 km. Tämän lisäksi ladattavan hybridin käyttövoimavero on myös huomattavasti alhaisempi. (Koistinen, 2020; Autotalli.com, 2021)

	Audi A6 55 TFSIe 2020	Audi sQ5 2017
Voimanlähde	Bensiini+sähkömoottori	Bensiinimoottori
Hybridiaste	Ladattava hybridi	-
Hybriditekniikka	rinnakkaishybridi	-
Polttomoottorin suurin teho [kW]	185	260
Sähkömoottorin suurin teho [kW]	105	-
Auton kokonaisteho [kW]	270	260
Hybridiakun kapasiteetti [kWh]	14,1	-
Polttomoottorin keskipitkulutus [l/100km]	1,8	8,5
Ulkoisen latauksen sähkönkulutus [kWh/100km]	14,1	-
Käyttövoimavero [€/vuosi]	49,28	304,51
Laskuissa käytetyt polttoaine- ja sähköhinnat: Bensiini (E95)=1,5€/l, Diesel= 1,4 €/l, Sähkö= 0,15 €/kWh		
Vuosikustannukset (10 tkm) [€]	530,78	1579,51
Vuosikustannukset (15 tkm) [€]	771,53	2217,01
Vuosikustannukset (20 tkm) [€]	1012,28	2854,51
Vuosikustannukset (25 tkm) [€]	1253,03	3492,01

Kuva 15. Audin ladattava hybridi- ja polttomoottoriauto kustannusvertailussa.

7 YHTEENVETO

Kirjallisuustutkimus sujui hyvin ja työn alussa asetettuihin päämääriin päästiin. Työssä jaotellaan ja vertaillaan hybridivoimanlähteitä hybridiasteen ja voimansiirron osalta. Hybridiasteiden jaottelussa kerrotaan ominaispiirteitä eri hybridiasteille ja voimansiirron jaottelussa kerrotaan voimansiirtoratkaisuiden soveltuvuutta eri hybridiasteille. Työssä esitellään myös yleiset käytössä olevat ratkaisut sähköenergian keräämiseen akustolle.

Hybridivoimanlähteiden jaottelu hybridiasteen mukaan osoittautui työn monimutkaisimmaksi osioksi. Hybridiasteita on lukuisia erilaisia ja niiden välinen raja voi olla hyvinkin häilyvä. Helpoimmin ja selkeimmin hybridiasteet voidaan jakaa latausmahdollisuuden mukaan. Tästä eteenpäin jaotellessa hybridiasteita, etenkin itselataavien hybridien jaottelussa hybridiasteiden erot voivat olla häilyviä.

Häilyviin eroihin hybridiasteiden välillä vaikuttaa muun muassa hybridiautojen nopea kehitys, jonka tuloksena muun muassa käytettävien sähkömoottoreiden ja akkujen tekniikka on kehittynyt. Tästä syystä hybridijärjestelmille eri hybridiasteilla kerätyt suuntaa antavat tiedot onkin kerätty autovalmistajien sivustoilta varmistamaan uusin tieto. Hybridiasteiden jaottelussa ilmeni myös vähemmän käytettyjä hybridiasteeseen viittaavia termejä, joten nämäkin esiteltiin lyhyesti.

Hybridivoimansiirron jaottelu on selkeää. Pääjako voimansiirtoon vaikuttavien voimanlähteiden perusteella rajaa ratkaisut kolmeen kategoriaan: sarjahybridiin, rinnakkaishybridiin ja yhdistelmähybridiin. Sarjahybridin voimalinjassa on hyvin rajallisesti mahdollisuuksia tehdä teknisiä muutoksia. Tämä johtuu siitä, että ainoastaan sähkömoottori on kytkettynä voimalinjaan. Toisaalta polttomoottorin ollessa irrallinen voimalinjasta, voidaan se sijoitella auton runkoon hyvin vapaasti.

Helposti eniten erilaisia voimalinjaratkaisuita voidaan tehdä rinnakkaishybridistä. Kahden voimanlähteen voimansiirto voidaankin jakaa vielä kahteen osaan sen perusteella, toimivatko moottorit samalla vai eri akselilla. Erilaisia ratkaisuja samalla akselilla toimiville moottoreille voidaan tehdä muuttamalla voimansiirron pääkomponenttien järjestystä. Akselijaon lisäksi voimansiirtoratkaisuiden määrä voidaan moninkertaistaa käyttämällä useampaa sähkömoottoria. Työssä keskitytään esittelemään mahdolliset ratkaisut yhdellä sähkömoottorilla, jonka avulla ratkaisujen määrä saadaan

rajattua kohtuulliseksi. Työssä myös kerrotaan, miten yhdistelemällä eri ratkaisuita voidaan muodostaa kahden sähkömoottorin hybridivoimanlähteitä.

Hybridivoimansiirron pääjaon kolmas ratkaisu on yhdistelmähybridi. Yhdistelmähybridin voimansiirrossa pääkomponenttina on planeettavaihteisto tai planeettavaihteistojen muodostama kokonaisuus, jolla ohjataan voimanlähteiden yhteistoimintaa voimantuottoon renkaille. Työssä jaotellaan yhdistelmähybridit kolmeen osaan voimanjakamisen perusteella eri komponenttien välillä.

Hybridivoimanlähteiden jakamisen ja esittelyn jälkeen pohdintaosiossa on vertailua hybridiasteiden välillä hybridiasteet kokoavan kuvan pohjalta. Pohdintaosiossa myös vertaillaan hybridiautoja polttomoottori- ja sähköautoihin autovalmistajien ja kuluttajien näkökulmasta. Pohdintaosiesta pääsee käsitykseen siitä, miksi hybridiautojen suosio on kasvamassa ja miksi niiden valmistus on yhä suurempi osa autovalmistajien kokonaistuotantoa.

LÄHDELUETTELO

- Autotalli.com. (2021). Vaihtootot / Audi sQ5 Saatavissa: <https://www.autotalli.com/vaihtooto/37889806/Audi/SQ5/2017/Helsinki?pos=7&page=1&searchType=usedCar> [Viitattu 3.3.2021]
- Bridges, H. (2015). Hybrid Vehicles and Hybrid Electric Vehicles: New Developments, Energy Management and Emerging Technologies
- Capata, R. (2018). Urban and Extra-Urban Hybrid Vehicles: A Technological Review. *Energies* (19961073), 11(11), 2924. <https://doi.org/10.3390/en11112924>
- Emadi, A., Lee, Y. J. & Rajashekara, K. (2008). Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric, and plug-in hybrid electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(6), 2237-2245. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.922768>
- Granström Teemu. (2018). Koeajossa BMW i3 94 Ah Range Extender. Saatavissa: <https://www.autotalli.com/artikkeli/koeajossa-bmw-i3-94-ah-range-extender> [Viitattu 16.2.2021]
- Granström Teemu. (2019). Audin näkemys kevythybridistä: uusi A4 V6-dieselillä 347 hv ja 700 Nm. Saatavissa: <https://www.autotalli.com/artikkeli/audin-nakemys-kevythybridista--uusi-a4-v6-dieselilla-347-hv-ja-700-nm> [Viitattu 12.2.2021]
- Husain, I. (2011). *Electric and Hybrid Vehicles: Design Fundamentals*, Second Edition. CRC Press.
- Hyundai Motor Finland. (2021). Hyundai IONIQ Hybrid tekniikka. Saatavissa: <https://www.hyundai.fi/mallisto/ioniq-hybrid/> [Viitattu 16.2.2021]
- Kia Motors Finland. (2020a). Kia Niro Plug-in hybrid tekniikka ja varusteet. Saatavissa: <https://www.kia.com/fi/lataa-esite.9856cc19-7ac7-4a23-a6eb-52d03ce93db6/#/> [Viitattu 16.2.2021]
- Kia Motors Finland. (2020b). KIA Sportage tekniikka ja varusteet. Saatavissa: <https://www.kia.com/fi/lataa-esite.9856cc19-7ac7-4a23-a6eb-52d03ce93db6/#/> [Viitattu 16.2.2021]
- Kia Motors Finland Oy. (2020). KIA Niro hybrid tekniikka ja varusteet. Saatavissa: <https://www.kia.com/fi/lataa-esite.9856cc19-7ac7-4a23-a6eb-52d03ce93db6/#/> [Viitattu 16.2.2021]
- Koistinen Robert. (2020). Isot lataushybridit tuovat luksusta arkeen. *Tekniikan Maailma*, 68(22), s. 20–41.
- Lexus Europe. (2021). Lexus Nx tekniset tiedot. Saatavissa: <https://www.lexus.fi/car-models/nx/#key-features> [Viitattu 16.2.2021]

Liikenne- ja viestintävirasto. Traficom autovertaamo. Saatavissa:

<https://autovertaamo.traficom.fi/> [Viitattu 3.3.2021]

Munukka Petri. (2019). Koeajo: sähkökkää sähköavustusta – Mercedes-Benz C 200 EQ-Boost. Saatavissa: <https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/koeajo-sahakkaa-sahkoavustusta-mercedes-benz-c-200-eq-boost/> [Viitattu 16.2.2021]

Nieminen Jussa. (2019). Sakkouhka tuo sähköautojen vyöryn. Tekniikan Maailma, 67(18), s. 6–10.

Pekka Pohjonen. (2018). Mitä eroa on mikrohybridillä, itselataavalla hybridillä ja pistokehybridillä? Yleistietoa sähköautoista. Saatavissa:

<https://www.autotaloampeeri.fi/blogi/hybridityypit/> [Viitattu 11.2.2021]

Posa Henri. (2020). Käytetyt erikoisuudet – Opel Ampera. Saatavissa:

<https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/kaytetyt-erikoisuudet-opel-ampera/> [Viitattu 16.2.2021]

Posa Henri, & Ahtiainen Lauri. (2020). Aivan kaikki, mitä sinun tulee tietää hybrideistä.

Saatavissa: <https://moottori.fi/ajoneuvot/jutut/niin-mika-oli-aivan-kaikki-mita-sinun-tulee-tietaa-hybrideista/> [Viitattu 11.2.2021]

Toyota Auto Finland Oy. (2021). Toyota Rav4 hybrid tekniset tiedot. Saatavissa:

<https://www.toyota.fi/autot/rav4/varusteet.json> [Viitattu 16.2.2021]

Toyota Motors Finland Oy. (2021). Toyota Rav4 Plug-in Hybrid. Saatavissa:

<https://www.toyota.fi/autot/rav4-plugin/varusteet.json> [Viitattu 16.2.2021]

Vinot, E. & Trigui, R. (2013). Optimal energy management of HEVs with hybrid storage system. Energy Conversion and Management, 76, 437-452.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.065>

Wu, G., Zhang, X. & Dong, Z. (2015). Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016003214001288#bib2>

Xue, Q., Zhang, X., Teng, T., Zhang, J., Feng, Z. & Lv, Q. (2020). A Comprehensive Review on Classification, Energy Management Strategy, and Control Algorithm for Hybrid Electric Vehicles. Energies (19961073), 13(20), 5355.

<https://doi.org/10.3390/en13205355>

Zhang, X., Mi, C. C. & Yin, C. (2014). Active-charging based powertrain control in series hybrid electric vehicles for efficiency improvement and battery lifetime extension. Journal of Power Sources, 245, 292–300.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.117>